

东喜马拉雅构造结墨脱剪切带特征及其区域构造意义*

董汉文¹ 许志琴^{1**} 李源¹ 刘钊²

DONG HanWen¹, XU ZhiQin^{1**}, LI Yuan¹ and LIU Zhao²

1. 大陆构造与动力学国家重点实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

2. 中国地质大学, 北京 100083

1. State Key Laboratory of Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2014-02-10 收稿, 2014-05-20 改回.

Dong HW, Xu ZQ, Li Y and Liu Z. 2014. Characteristics of the Medog shear zone in the Eastern Himalayan Syntaxis and its tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 30(8):2229–2240

Abstract The Eastern Himalayan Syntaxis is bounded by the Medog shear zone in the east and the Dongjiu-Milin shear zone in the west. This paper focuses on the geometry and kinematics of Medog shear zone, which can be further divided into three sections according to the structure, deformation and metamorphic grade: the NE-SW trending Aniqiao-Xirang normal-sense shear zone, the N-S trending Pangxin-Damu dextral shear zone and the NW-SE trending Jialasa-Gandeng thrust-sense shear zone. Based on structural deformation, petrography and the quartz EBSD fabrics, two patterns of deformation in the Medog shear zone are observed, which are high-temperature and low-temperature deformations, respectively. The study shows that high-temperature deformation is mainly within $\{10\bar{1}0\} \langle a \rangle$ slip system, with accordant temperature of 550 ~ 650°C (amphibolite facies). In addition, $\{10\bar{1}0\} \langle c \rangle$ slip system was also observed in the northern and middle of the Medog shear zone, which means that the deformation temperature can be even higher than 650°C. The low-temperature deformation is mainly within $\{10\bar{1}1\} \langle a \rangle$ and $\{0001\} \langle a \rangle$ slip systems, which indicate lower temperature of <550°C and green-schist facies. Combining with the Dongjiu-Milin shear zone, it is suggested that the Namche Barwa metamorphic terrane was constrained by the two shear zones, then moved northward and subducted deeply beneath the Lhasa terrane.

Key words Structural deformation; Quartz EBSD fabrics; Medog shear zone; The Eastern Himalayan Syntaxis

摘要 东喜马拉雅构造结东、西两侧分别为墨脱剪切带和东久-米林剪切带, 本文以墨脱剪切带为研究对象, 从构造变形几何学和组构运动学方面进行详细研究。结果表明: ①剪切带不同部位的变形性质具有逐渐演化的特征, 基于产状、变形性质及变质程度等的变化将其从南到北分为三部分: NE走向具右行兼上盘下滑性质的阿尼桥-希让段、近N-S向具右行走滑性质的旁辛-达木段及N(N)W向具右行兼逆冲性质的甘登-加拉萨段; ②在墨脱剪切带内识别出两类剪切变形: 高温剪切变形和低温剪切变形。除了构造变形及岩相学证据外, 石英EBSD组构数据显示区内高温剪切变形以 $\{10\bar{1}0\} \langle a \rangle$ 滑移系为主, 对应的温度为550~650°C, 达到高温角闪岩相, 局部(北端和中段)还出现了 $\{10\bar{1}0\} \langle c \rangle$ 滑移系, 温度更高, 大于650°C, 相当于下地壳的深度; 低温剪切变形以 $\{10\bar{1}1\} \langle a \rangle$ 和 $\{0001\} \langle a \rangle$ 滑移系为主, 对应的温度小于550°C, 即剪切变形发生在绿片岩相或绿片岩相以下的构造环境。结合西界东久-米林剪切带的构造特征, 推测在印度板块和欧亚板块碰撞之后, 南迦巴瓦变质体受制于这两条剪切带而相对拉萨地体向北推移, 并楔入拉萨地体之下。

关键词 构造变形; 石英EBSD组构; 墨脱剪切带; 东喜马拉雅构造结

中图法分类号 P542.3

* 本文受中国地质调查局地质调查项目(1212010818035)和国家自然科学基金创新研究群体项目(41221061)联合资助。

第一作者简介: 董汉文, 男, 1988年生, 博士生, 构造地质学专业, E-mail: donghanwen123@126.com

** 通讯作者: 许志琴, 女, 研究员, 中国科学院院士, 构造地质学, 长期从事大陆动力学研究工作, E-mail: xzq@ccsd.cn

1 引言

喜马拉雅造山带东、西两端分别存在一个构造急剧转向的构造结,即:东喜马拉雅构造结(the Eastern Himalyan Syntaxis,以下简称东构造结)和西喜马拉雅构造结(the Western Himalayan Syntaxis)。东构造结处于欧亚、印度大陆及缅甸地块的交汇点,是特提斯构造体系正向碰撞和侧向走滑的转换部位(Holt *et al.*, 1991),也是整个喜马拉雅造山带中构造应力最强烈、隆升和剥蚀速率最快、新生代岩浆活动、深熔作用和变质作用最强的地区(Ding *et al.*, 2001; Booth *et al.*, 2004; 郑来林等, 2004; 孙志明等, 2004a, b; 许志琴等, 2008; 张泽明等, 2007; 戚学祥等, 2010; Zeng *et al.*, 2011),是研究造山作用过程中地壳重造(变质、变形和重熔)的野外实验室。东构造结内部十分复杂,是一个经历过多期复杂地质演化历史,由不同层次、不同时期和形成于不同构造环境地质体所组成的变质杂岩体,已引起国内外地学界的广泛关注,尤其是发现大片高压麻粒岩以后,不少学者更是视其为观察青藏高原深部地壳结构的窗口(丁林等, 1995; 丁林和钟大赉, 1999; 钟大赉和丁林, 1995; Liu and Zhong, 1997; 刘焰和钟大赉, 1998)。近些年,随着青藏高原成为地球科学研究的热点,对东构造结的研究也不断地深入和加强。不少学者对东构造结的岩石组成、构造演化、隆升历史以及形成机制等方面进行了研究,并取得了不少新的进展。但是,迄今为止仍有许多重大的科学疑难问题没有解决,需要做进一步的研究,如:1)东构造结是如何形成的;2)在与东构造结遥相呼应的西构造结已发现多处高压(HP)和超高压(UHP)榴辉岩(Tonarini *et al.*, 1993; Le Fort *et al.*, 1997),东构造结是否也存在HP和UHP榴辉岩;3)东构造结受限于东久-米林剪切带(DMSZ)和墨脱剪切带(MSZ),在其形成过程中,这两条剪切带是怎样演化的;等等。

张进江等(2003)通过构造年代学分析认为东构造结内部经历了前后两类不同性质的构造运动,早期为韧性挤压、走滑变形体系,表现为构造结内部的近南北向缩短,进一步细分为三个阶段,分别为62~59Ma、23Ma和13Ma,其峰期活动时限为18~23Ma;晚期(6~7Ma)构造表现为以南迦巴瓦峰为中心外倾同心状高角度韧性正断层体系,可能是快速隆升的垮塌构造(张进江等, 2003)。许志琴等(2008)对东久-米林剪切带进行了详细的运动学、组构学研究,提出该剪切带不同部位的变形性质具有逐渐演化的特征。在此基础上,Xu *et al.* (2012)通过对糜棱质含石榴长英质片麻岩进行锆石SHRIMP U-Pb测年,得到一组高精度的锆石变质年龄,从而提出印度板块东特角和拉萨地体初始碰撞时代为53Ma。

墨脱剪切带作为东构造结的东界,有其相对独特的构造演化历程,是深入了解东构造结构造演化的关键部位之一。但由于自然、交通等因素的影响,以往的工作大多集中于南

迦巴瓦变质体或其西界(东久-米林剪切带)(Ding *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 2002; 张进江等, 2003; 刘焰等, 2006; 许志琴等, 2008; Xu *et al.*, 2012)。相比之下,东界有些被“冷落”。因此,本文有目的的选取东喜马拉雅构造结墨脱地区作为研究对象,拟通过对墨脱剪切带内变形构造的研究,并结合电子背散射衍射(Electron backscatter diffraction,简称EBSD)技术,试图查明其运动学性质、规模大小、以及变形变质条件等,进一步探讨东构造结的形成机制。这些研究不仅对东构造结的形成和演化,而且对青藏高原形成、隆升和扩展过程的认识具有重要意义。

2 大地构造位置及构造单元组成

前人通过对东喜马拉雅构造结火山-沉积建造、岩浆岩分布、变质岩类型及其共生组合、大地构造环境等综合研究,将研究区划分为三个构造单元:南迦巴瓦变质体(印度陆块)、雅鲁藏布江缝合带和冈底斯-拉萨陆块(周云生和张旗, 1981; 王天武, 1985; 刘玉海, 1985; 章振根等, 1992)。南迦巴瓦变质体位于呈倒“U”形的雅鲁藏布江缝合带内侧,是高喜马拉雅岩片东段的组成部分(许志琴等, 2008),其构造格架总体呈一个复式背形构造,轴面向NW陡倾,倾角约80°(王天武, 1985)。由于研究方法和手段的不同,不同的地质学家从各自的研究视角对南迦巴瓦变质体进行划分,孙志明等(2004a)根据南迦巴瓦岩群的原岩建造、变质程度的不同、变形样式的差异,将其解体为三套岩石组合:直白岩组、派乡岩组和多雄拉混合岩;许志琴等(2008)根据岩性、变质程度、变形特征及构造边界的性质,进一步将其分为四个二级构造单元:比鲁构造岩片、直白构造岩片、南派乡构造岩片和多雄拉变质穹窿。雅鲁藏布江缝合带大体沿雅鲁藏布江大拐弯展布,属一条宽20~40km的复杂构造带。带内以蛇绿岩和混杂堆积为特征,岩层挤压变形强烈,以断裂为主。雅鲁藏布江缝合带外侧为冈底斯-拉萨陆块,亦是一个与雅鲁藏布江大拐弯形态相似的弧形构造-岩浆带,主要由中-新元古代念青唐古拉群和白垩-古近纪冈底斯花岗岩浆带组成。

东喜马拉雅构造结的构造格架总体呈一个复式背形构造,背形构造的东、西两侧分别为墨脱右行剪切带和东久-米林左行剪切带(Liu and Zhong, 1997; 刘焰和钟大赉, 1998; Ding *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 2002; 张进江等, 2003; 许志琴等, 2008; Xu *et al.*, 2012)。两条剪切带内的岩石组合较为相似,主要由云母片岩、角闪岩、石英岩、糜棱状花岗岩和大理岩等组成。前人对东久-米林剪切带进行了翔实的野外及室内研究工作,张进江等(2003)通过构造年代学分析认为东喜马拉雅构造结内部及其东西边界均经历了前后两类不同性质的构造运动,早期为韧性挤压、走滑变形体系;晚期以南迦巴瓦峰为中心外倾同心状高角度韧性正断层体系,可能是快速隆升的垮塌构造。许志琴等对东久-米林剪切带进行了详细的运动学、组构学研究,提出其不同部位的变形性

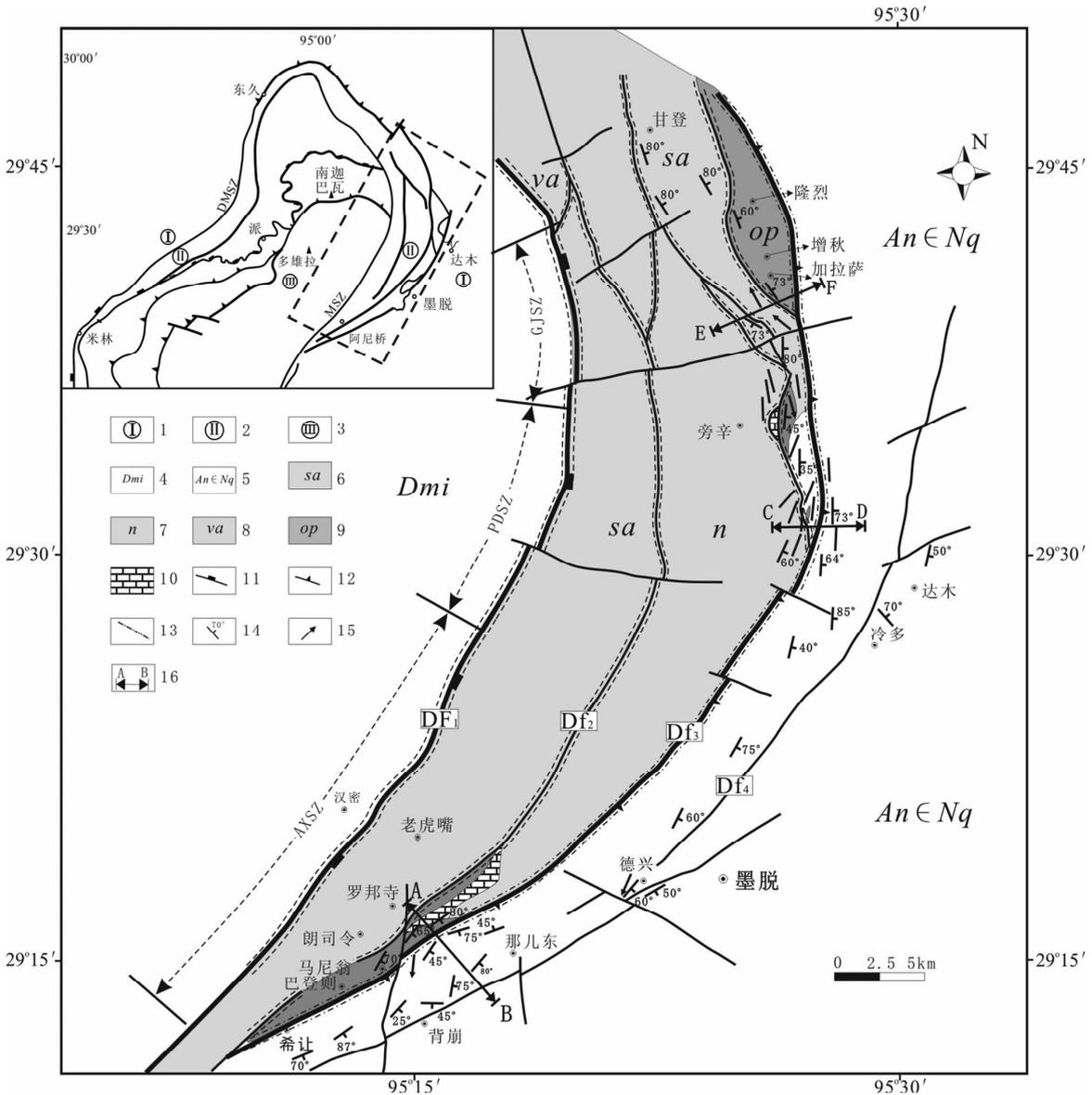


图1 墨脱剪切带构造地质图

DMSZ-东久-米林剪切带;MSZ-墨脱剪切带;AXSZ-阿尼桥-希让韧性剪切带;PDSZ-旁辛-达木韧性剪切带;GJSZ-甘登-加拉萨韧性剪切带. 1-冈底斯-拉萨陆块;2-雅鲁藏布江缝合带;3-南迦巴瓦变质体(印度陆块);4-多雄拉混合岩;5-念青唐古拉岩群;6-石英片岩岩片;7-混杂带基质;8-火山弧岩片;9-蛇绿岩片;10-碳酸盐岩块;11-拆离断离;12-逆冲断裂;13-推测断裂;14-面理及产状;15-拉伸线理;16-构造剖面位置

Fig. 1 Simplified tectonic map of the Medog shear zone

质具有逐渐演化的特征,并结合新的高精度锆石 SHRIMP、LA-ICP-MS U-Pb 年龄和黑云母/角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄,提出东喜马拉雅构造结两阶段的演化模型(许志琴等, 2008; Xu *et al.*, 2012)。

3 墨脱剪切带的构造几何特征及运动学分析

该带两端较窄(10km)中间较宽(约30km),总体呈“新月”形(图1),根据我们对墨脱地区的地质考察,发现墨脱剪

切带与东久-米林剪切带有一定相似性,带内不同部位的变形性质亦具有逐渐演化的特征。基于产状、变形性质及变质程度等的变化将墨脱剪切带从南至北分为三部分:NE走向的阿尼桥-希让段,近N-S向的旁辛-达木段及N(N)W向的甘登-加拉萨段。

3.1 阿尼桥-希让段

该段为墨脱剪切带的最南端,主要由糜棱岩化的石英岩、云母石英片岩、石榴石黑云角闪片岩、斜长片麻岩等组成(图2,剖面A-B),总体变质程度为绿片岩相,该套岩石发生

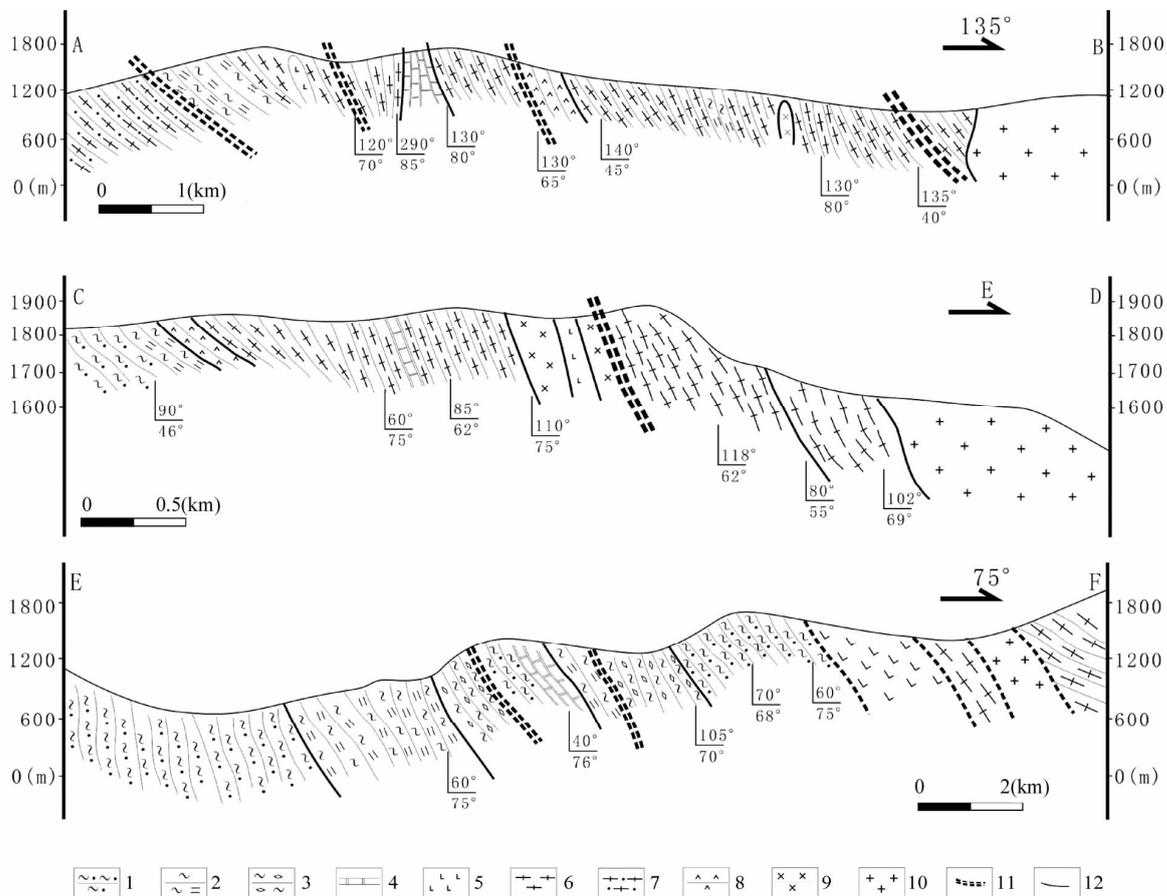


图2 墨脱剪切带构造剖面图(剖面位置见图1)

A-B:横穿阿尼桥-希让段东侧的构造剖面;C-D:横穿旁辛-达木段东侧的构造剖面;E-F:横穿甘登-加拉萨段东侧的构造剖面. 1-黑云母石英片岩;2-二云母石英片岩;3-含石榴石云母石英片岩;4-大理岩块;5-超基性岩;6-花岗岩片麻岩;7-斜长角闪片麻岩;8-角闪岩;9-辉长岩;10-花岗岩;11-韧性剪切带;12-岩层界限

Fig. 2 Structural section of deformation of the Medog shear zone (see Fig. 1 for locality of the section)

强烈糜棱岩化而发育透入性的线理和面理,面理上发育有NE-SW向的矿物拉伸线理,通常组成矿物是石英、黑云母或角闪石(图3d)。该带总体走向为NE-SW向,倾向SE,倾角 $50^{\circ} \sim 70^{\circ}$,局部较缓,如:罗邦寺附近斜长角闪片麻岩产状为 $150^{\circ} \angle 25^{\circ}$,26个面理测量数据的赤平投影结果略显分散(图4a),但仍然能反映出一组NE-SW向的优势面理。翔实的野外观察显示,阿尼桥-希让剪切带表现为SE盘(上盘)下落的正断层(图3a)。糜棱岩中发育的S-C面理、云母鱼及石榴子石旋转碎斑(图3b)等运动学标志指示其为右行剪切带。沿着阿尼桥-希让剪切带,我们还观察到念青唐古拉岩群中的片麻岩发生了混合岩化,长英质条带拉长,运动学标志指示为右行运动(图3a)。因此,阿尼桥-希让段为具有斜向正滑运动学特征的右行剪切带。

3.2 旁辛-达木段

该段为墨脱剪切带最宽部位,近S-N走向。该段变形带的岩石组合为糜棱岩化的云母片岩、石英岩、花岗岩片麻岩、

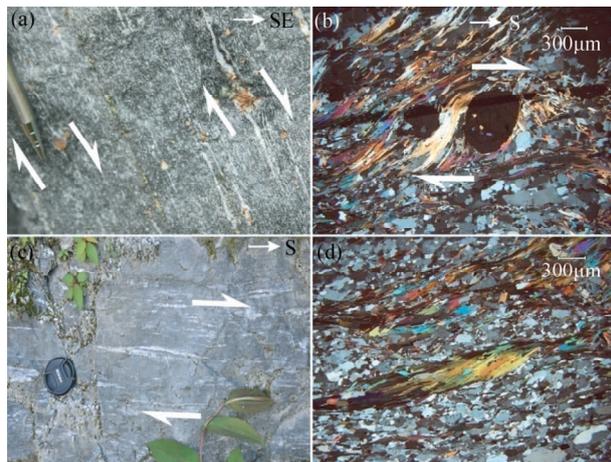


图3 墨脱剪切带南端阿尼桥-希让段内宏观和微观构造样式

(a)-含石榴子石斜长片麻岩,不对称碎斑系指示上盘下滑运动;(b)-黑云母定向拉长,环绕石榴子石,石榴子石旋转碎斑指示右行运动性质;(c)-条带状混合片麻岩,发育不对称碎斑,指示右行运动;(d)-含石榴子石云母片岩中黑云母定向排列
Fig. 3 Macro- and micro-structure of the Aniqiao-Xirang area, the south section of the Medog shear zone

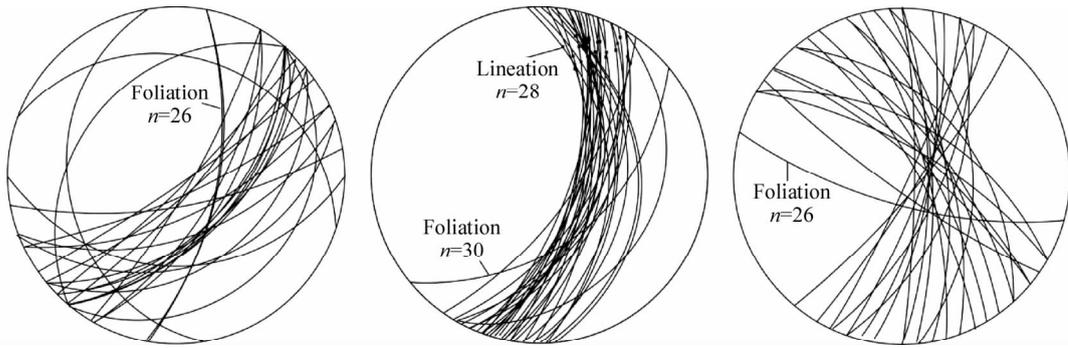


图4 墨脱剪切带面理和拉伸线理赤平投影图

(a)-阿尼桥-希让段;(b)-旁辛-达木段;(c)-甘登-加拉萨段

Fig.4 Stereogram of the foliation and stretching lineation in the Medog shear zone

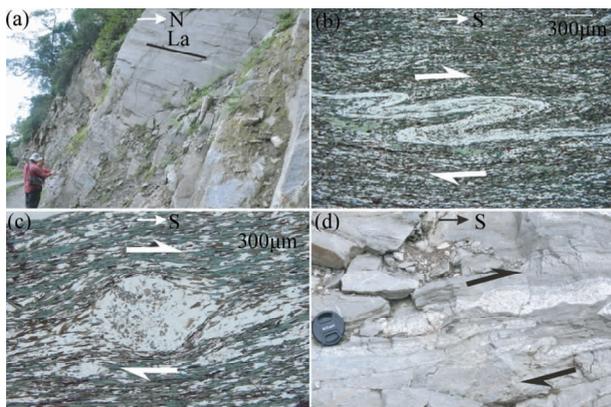


图5 墨脱剪切带中段旁辛-达木段内宏观和微观构造样式

(a)-条带状片麻岩,旋转碎斑指示右行走滑运动;(b)-斜长角闪片麻岩中小褶皱指示为右行运动;(c)-斜长角闪片麻岩中旋转碎斑指示为右行运动;(d)-条带状混合片麻岩,面理褶皱指示为右行运动

Fig. 5 Macro- and micro-structure of the Pangxin-Damu area, the centre section of the Medog shear zone

混合岩及大理岩等(图2,剖面C-D),变质程度以角闪岩相-绿片岩相为主。发育透入性剪切面理和矿物拉伸线理,面理向东陡倾,拉伸线理近水平或略向北侧伏(图5a)。图4b中30个面理数据赤平投影显示近N-S向的优势面理,28个拉伸线理测量数据显示为近N-S向或NNE-SSW向,角度较小,说明该段以走滑运动性质为主。结合不对称眼球构造(图5c)及面理褶皱(图5b, d)等运动学标志指示该带为一右行走滑剪切带。

3.3 甘登-加拉萨段

在甘登至加拉萨地区,该地区大致走向为 $300^{\circ} \sim 345^{\circ}$,主要由糜棱岩化花岗岩、花岗质混合岩、(长英质)片麻岩、角闪岩、薄层云母石英片岩、和大理岩等组成(图2,剖面E-F),面理倾向NE,倾角 $60^{\circ} \sim 75^{\circ}$ (图6d),矿物拉伸线理向NW



图6 墨脱剪切带北段甘登-加拉萨段宏观构造样式

(a)-糜棱面理倾向NE,倾角 75° ,矿物拉伸线理约 55° ; (b)-条带状混合片麻岩中浅色条带变形强烈,面理褶皱发育,明显指示为逆冲运动性质;(c)-云母石英片岩中渗透性面理褶皱及旋转碎斑指示右行走滑性质;(d)-(云母)石英片岩向(N)E陡倾,产状为 $325^{\circ}(\text{NE})73^{\circ}$

Fig. 6 Macrostructure of the Gandeng-Jialasa area, the north section of the Medog shear zone

方向侧伏,在面理上最大侧伏角为东侧伏约 55° (图6a)。图4c中26个面理数据赤平投影显示NW-SE向的优势面理。结合面理褶皱(图6b)及不对称“眼球”构造(图6c)等运动学标志认为该带为一右行兼逆冲运动的剪切带。

4 墨脱剪切带的构造变形分析

东构造结的边界断裂将外围冈底斯岩浆岩带和内侧的高喜马拉雅麻粒岩相片麻岩分割开,其中西边界变形带由一系列强烈变形左行剪切带组成(张进江等,2003),而东边界变形带由一系列强烈变形右行剪切带组成。带内由强、弱变形带相间,岩石由于构造作用发生了不同程度的变形,形成

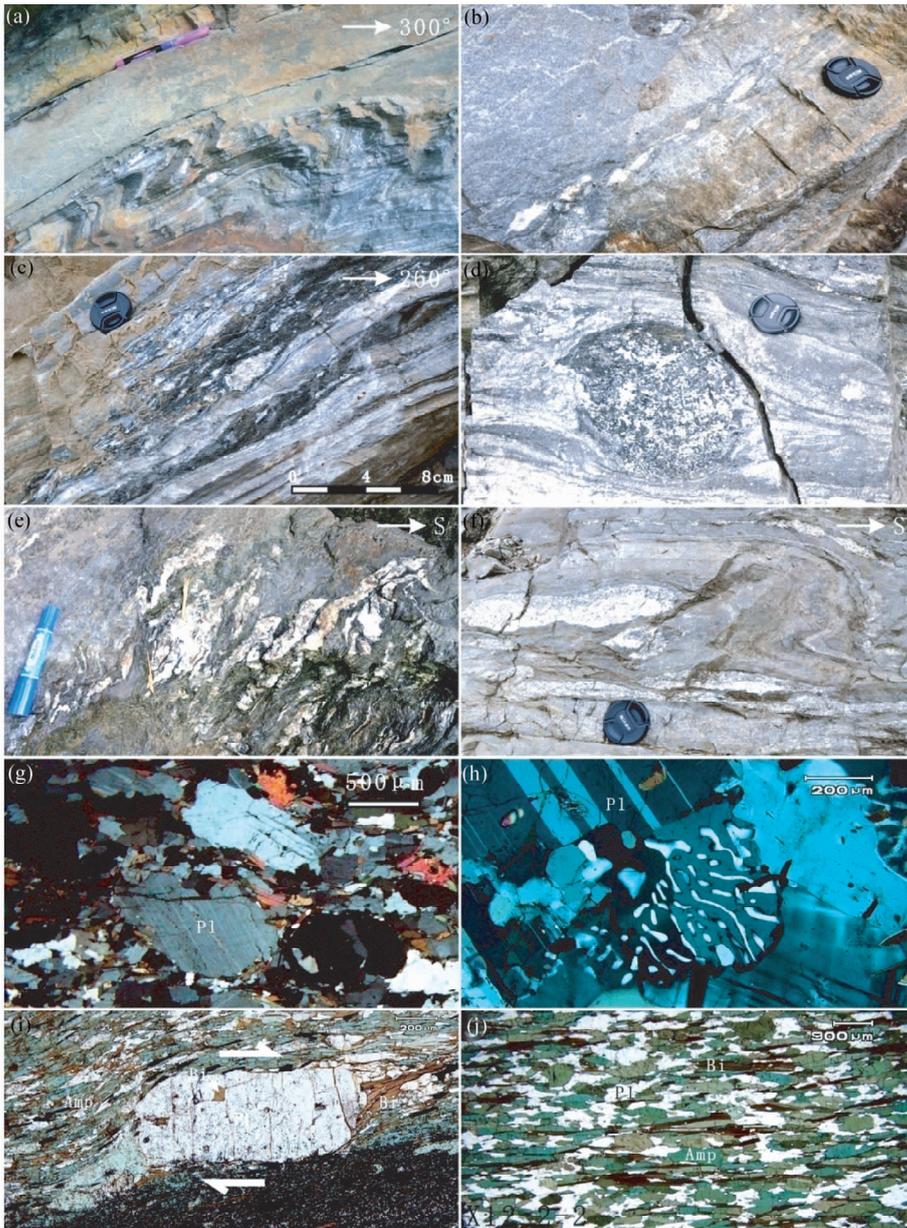


图7 墨脱剪切带内高温变形组构特征

(a)-云母片岩与角闪质岩石层中发育的A型褶皱;(b)-构造片麻岩中石香肠化条带;(c)-构造剪切变形中发生分异作用形成明暗相间的条带;(d)-条带状片麻岩中暗色包体发生旋转;(e、f)-构造片麻岩中条带强烈弯曲,形成不对称流动褶皱;(g)-斜长石塑性变形呈透镜状,动态重结晶形成核幔结构;(h)-环绕斜长石颗粒的边缘和尾部出现的边缘蠕英结构;(i)-斜长石在剪切变形过程中发生强烈的韧性变形,拉长并旋转,呈 α 旋转斑,尾端由黑云母、角闪石等矿物组成;(j)-角闪石普遍单向延长,单晶呈柱状,平行定向排列,且平行于岩石主要拉伸线理

Fig.7 High-temperature ductile deformations of the Medog shear zone

了构造片岩、构造片麻岩及糜棱岩化岩等构造岩。同构造矿物组合和变形机制分析表明,墨脱剪切带内至少发生了两期构造变形:早期高温塑性流动变形及晚期低温脆-韧性变形。

4.1 高温变形

从宏观角度来看,在墨脱变质带中广泛出现遭受强烈右行剪切变形的现象,如在云母片岩与角闪质岩石层中常见形

态复杂的A型褶皱(图7a),两翼发育近水平的拉伸线理,其枢纽NNW-SSE向。与此同时,遭受强烈同构造剪切变形改造的深变质岩中矿物发生分异(如黑云母、角闪石等暗色矿物和长石、石英等浅色矿物)形成明暗相间的条带,并表现出不同的样式:(1)平直密集的明暗相间的条带(图7c);(2)条带石香肠化,如同由多个透镜体连接组成(图7b);(3)条带强烈弯曲,形成不对称流动褶皱(图7e、f),矿物集合体转

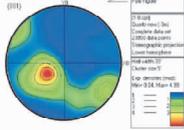
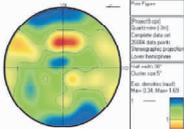
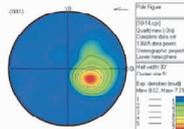
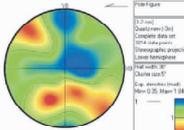
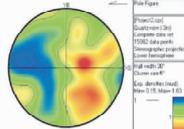
变质相	葡萄石-绿纤石相	绿片岩相	角闪岩相	麻粒岩相	文献引用				
温度	350°C	400°C	450°C	500°C	550°C	600°C	650°C	700°C	稽少丞, 1988
区域	样品	石英晶格优选定向			结构模式				
阿尼桥-墨脱段	X2-12-3				滑移系: $\{10\bar{1}0\} \langle a \rangle$ 变质相: 角闪岩相 变形温度 (°C): 550-650				
	X2-8-2				滑移系: $\{10\bar{1}1\} \langle a \rangle$ $\{10\bar{1}0\} \langle c \rangle$				
	X2-13-3				滑移系: $\{10\bar{1}0\} \langle a \rangle$ 变质相: 角闪岩相 变形温度 (°C): 550-650				
	X4-13-1				滑移系: $\{0001\} \langle a \rangle$ 变质相: 葡萄石-绿纤石相 变形温度 (°C): <400				
	X4-13-2				滑移系: $\{0001\} \langle a \rangle$ $\{10\bar{1}0\} \langle a \rangle$ $\{10\bar{1}0\} \langle c \rangle$				

图8 墨脱剪切带阿尼桥-希让段石英 EBSD 测量结果

Fig. 8 LPOs of quartz from the Aniqiao-Xirang shear zone (by EBSD measurement)

形成“眼球”构造。在高应变地区,线理极其发育而面理相对较弱,面理面上线理近水平。糜棱面理一般是由矿物或矿物集合体(角闪石的定向、扁豆状的石英集合体、长石条带、云母集合体等)的平行定向排列构成,与宏观成分层或条带平行分布。线理主要由定向拉长的角闪石、长石、黑云母以及变质矿物(如:夕线石)等矿物集合体呈现出来。线理一般具有低倾伏角,倾伏向近 N-S 向,局部地方略有差别。由于处于变质带的不同部位,剪切变形显示不均匀性,形成不同类型的条带状构造。局部可见糜棱岩化的片麻岩、部分熔融现象或包体旋转现象(图 7d)。剪切带中还发育矿物拉伸线理、杆状构造等变形组构,均显示了在高温剪切变形环境中形成。

高温变形的岩石在显微镜下主要表现为高温环境下的同构造矿物组合及角闪石、长石、石英等矿物的塑性变形。角闪石多为普通角闪石,普遍单向延长,细粒化强烈,单晶呈针柱状,平行定向排列,且平行于岩石主要拉伸线理(图 7j)。长石在剪切变形过程中发生强烈的韧性变形,拉长并发生旋

转(图 7i),长轴平行面理或小角度斜交,残斑边界发生动态重结晶形成核幔结构(图 7g),长石中还发育应力蠕英结构(图 7h)。石英多呈集合体,发生亚颗粒旋转重结晶和颗粒边界迁移重结晶作用,这些重结晶颗粒边界不规则或呈锯齿状,多数新生石英颗粒的内部都消光均匀、无应变。局部出现高温环境下的石英静态重结晶颗粒,颗粒边界平直、内部消光均匀,其 EBSD 测试结果显示为高温柱面滑移形成的组构,滑移系为 $\{10\bar{1}0\} \langle c \rangle$,尤其是旁辛-达木段和甘登-加拉萨段较为明显(图 8 和图 9,详述见本文 5.2 和 5.3)。

4.2 低温变形

前已述及,带内由强、弱变形带相间形成,往往交替发育。低温变质带中普遍发育片理(图 10a)、破劈理、糜棱面理、线理及构造角砾岩发生不同程度的透镜体化(图 10b)等。在显微镜下,此类变形以片状矿物定向排列、长石脆性变形及石英韧性变形等现象为主。黑云母退变质形成白云母和绿泥石,长石表现为低温环境下的双晶扭折和脆性破裂

变质相		葡萄石-绿纤石相	绿片岩相		角闪岩相	麻粒岩相	文献引用			
温度		350℃	400℃	450℃	500℃	550℃	600℃	650℃	700℃	嵇少丞, 1988
区域	样品	石英晶格优选定向							组构模式	
旁辛-达木段	X7-1-3								滑移系: $\{10\bar{1}0\}\langle a \rangle$ 变质相: 角闪岩相 变形温度 (°C): 550-650	
	X7-2-1								滑移系: $\{10\bar{1}0\}\langle a \rangle$ 变质相: 角闪岩相 变形温度 (°C): 550-650	
	X8-1-1								滑移系: $\{10\bar{1}0\}\langle a \rangle$ 变质相: 角闪岩相 变形温度 (°C): 550-650	
	X8-7-5								滑移系: $\{10\bar{1}0\}\langle c \rangle$ 变质相: 麻粒岩相 变形温度 (°C): >650	
	X11-3-2								滑移系: $\{10\bar{1}0\}\langle a \rangle$ $\{10\bar{1}1\}\langle a \rangle$	
	X11-3-8								滑移系: $\{10\bar{1}1\}\langle a \rangle$ 变质相: 绿片岩相 变形温度 (°C): 400-550	
	X12-1-4								滑移系: $\{10\bar{1}0\}\langle a \rangle$ 变质相: 角闪岩相 变形温度 (°C): 550-650	

图9 墨脱剪切带旁辛-达木段石英 EBSD 测量结果

Fig. 9 LPOs of quartz from the Pangxin-Damu shear zone (by EBSD measurement)

(图 10c)。石英条带与白云母条带相间排列, 石英主要发生低温韧性变形, 出现波状消光、带状消光、变形纹、亚颗粒、亚颗粒旋转动态重结晶现象(图 10d), 石英亚颗粒及重结晶颗粒消光不均匀显示矿物颗粒内部存在应变, 表明岩石变形发生在地壳浅部的绿片岩相(胡玲等, 2010)。与高温剪切带中的显微组构相比, 低温环境下长石以脆性变形为主, 石英的重结晶颗粒粒度小、具港湾状边界、消光不均匀, 部分石英条带是高温剪切带中石英多晶条带进一步重结晶形成的, 其 EBSD 测试结果显示为低温柱面滑移形成的组构, 滑移系为

$\{0001\}\langle a \rangle$, 在整个剪切带均有发育(图 8、图 9、图 10 和图 11)。

5 各段石英 EBSD 组构分析

剪切变形过程中矿物变形、剪切滑移的方向及滑移系的发育受到温度、围压、应力等因素的影响, 其中变形温度的影响尤为强烈(李刚等, 2012)。因此, 通过分析矿物结晶学优选方向可以确定晶体内发育的活动滑移系, 进而可以估算矿

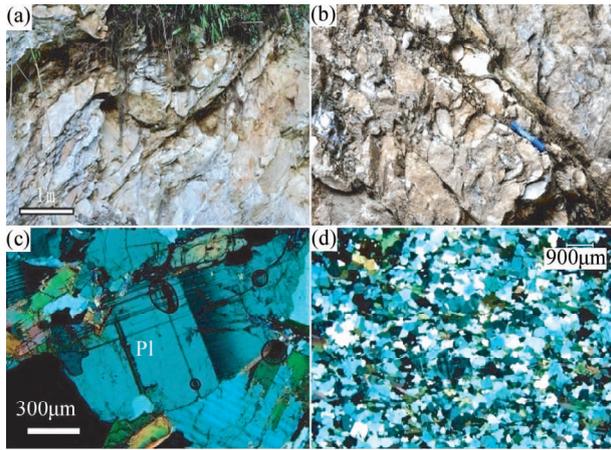


图 10 墨脱剪切带内低温变形组构特征

(a)-构造岩块强烈片理化;(b)-构造角砾岩呈透镜状;(c)-斜长石扭折现象;(d)-石英亚颗粒及动态重结晶现象

Fig. 10 Low-temperature ductile deformations of the Medog shear zone

物的变形温度。自十九世纪末费氏台(Universal stage microscopy)问世以来,组构技术的发展为定量研究晶体结构、变形温度及优选方向等提供了支持。但由于其精度有限,而且使用时非常繁琐枯燥和“费时”,大大限制了人们对岩石组构的研究(许志琴等,2009)。目前 EBSD 技术被广泛应用于分析矿物组构优选方位,快捷、简便和准确是这种技术的显著特点。本文所选样品沿垂直面理和平行线理的方向切制光薄片,并在大陆构造与动力学国家重点实验室对样品进行抛光,随后晶格优选方位(Lattice Preferred Orientation, 简称 LPO)数据的获取在 jsm-56101v 扫描电镜上采用交互模式来完成,用 20kV 的高能电子束轰击样品表面,工作距离通常为 20mm。具体实验流程参见文献(许志琴等,2009)。将测得的数据放入一个文件夹并在 HKLCHANNEL5 软件上统计其 LPO。一般采用下半球投影,组构图解的坐标轴设置为 X 轴平行于拉伸线理方向,XY 为面理,Z 垂直面理方向。

分别采集墨脱剪切带南端阿尼桥-希让段,中段旁辛-达木段及北端甘登-加拉萨段中的糜棱岩化和强烈变形的岩石进行石英的测量,获得不同类型的组构模式以及运动学特征。

5.1 阿尼桥-希让段的石英 EBSD 组构运动学特征

采自墨脱剪切带南端阿尼桥-希让段的样品为:二云母花岗岩片麻岩(X2-12-3 和 X2-13-3)、黑云斜长角闪片麻岩(X2-8-2)和含石榴石二云母长英质片麻岩(X4-13-1 和 X4-13-2)5 个样品。将上述样品进行石英颗粒的 EBSD 技术测定,所测数据点的范围为 3814 ~ 26684。实验结果表明(图 8),石英组构主要可以分为两类:(1)在 Y 轴附近的点极密(如 X2-12-3 和 X2-13-3),主要为中温柱面滑移形成的组构,滑移系为 $\{10\bar{1}0\} \langle a \rangle$,对应的温度 550 ~ 650℃,属于角闪岩

相(嵇少丞,1988);(2)基圆上的点极密(如 X4-13-1),主要为低温底面滑移形成的组构,滑移系为 $\{0001\} \langle a \rangle$,对应的温度小于 400℃,属于葡萄石-绿纤石相(嵇少丞,1988)。另外,在 X2-8-2 和 X4-13-2 中出现多个点极密,尤其是 X2-8-2 的组构图在 X 轴附近出现非常弱的点极密,可能是残留的早期高温变形组构,即低温变形叠加在高温或者中高温变形之上的特点。

5.2 旁辛-达木段的石英 EBSD 组构运动学特征

采自墨脱剪切带旁辛-达木段的样品为:混合岩化片麻岩(X7-1-3)、斜长角闪片麻岩(X7-2-1)、黑云斜长角闪片麻岩(X8-1-1)、含石榴石黑云斜长角闪片麻岩(X8-7-5)、石英云母片岩(X11-3-2 和 X12-1-4)及糜棱岩化斜长角闪片麻岩(X11-3-8)7 个样品。将上述样品进行石英颗粒的 EBSD 技术测定,所测数据点的范围为 7103 ~ 28554。实验结果表明(图 9),石英组构主要可以分为三类:(1)在 X 轴附近的点极密(如 X7-2-1 和 X8-7-5),主要为高温柱面滑移形成的组构,滑移系为 $\{10\bar{1}0\} \langle c \rangle$,对应的温度大于 650℃,属于麻粒岩相(嵇少丞,1988);(2)在 Y 轴附近的点极密(如 X7-1-3、X8-1-1、X11-3-2 和 X12-1-4),主要为中温柱面滑移形成的组构,滑移系为 $\{10\bar{1}0\} \langle a \rangle$,对应的温度为 550 ~ 650℃,属于角闪岩相(嵇少丞,1988),值得一提的是,在 X12-1-4 石英组构图上出现多个点极密,但 Y 轴附近的点极密明显比基圆及 X 轴上的点极密强;(3)在 Z 轴上的点极密(如 X4-13-1),主要为中低温滑移形成的组构,滑移系为 $\{10\bar{1}1\} \langle a \rangle$,对应的温度为 400 ~ 550℃,属于绿片岩相(嵇少丞,1988)。

5.3 甘登-加拉萨段的石英 EBSD 组构运动学特征

墨脱剪切带甘登-加拉萨段出露的岩石以石英岩、(云母)石英片岩或云母片岩为主,其间夹少量的角闪质岩石,其中在云母片岩中含有石榴石、夕线石等特征变质矿物,因此,用于石英颗粒的 EBSD 技术测定的 10 个样品中除了 3 个强烈变形的云母片岩外(X17-5-1、X17-5-2 及 X17-5-5),其它均为(云母)石英片岩(X16-1-2、X16-1-6、X16-3-1、X16-4-7、X16-5-1、X17-2-1 及 X17-3-2)。上述样品所测数据点的范围为 7018 ~ 29746。实验结果表明(图 11),石英组构主要可以分为三类:(1)在 X 轴附近的点极密(如 X16-1-2 和 X16-1-6),主要为高温柱面滑移形成的组构,滑移系为 $\{10\bar{1}0\} \langle c \rangle$,对应的温度大于 650℃,属于麻粒岩相(嵇少丞,1988);(2)在 Y 轴附近的点极密(如 X17-2-1、X17-3-2、X17-5-1、X17-5-2 及 X17-5-5),主要为中温柱面滑移形成的组构,滑移系为 $\{10\bar{1}0\} \langle a \rangle$,对应的温度为 550 ~ 650℃,属于角闪岩相(嵇少丞,1988),样品 X17-2-1 石英组构图上可见 Z 轴上有较弱的点极密,说明采样区域晚期变形对早期变形的改造不强烈;(3)在基圆上的点极密(如 X16-3-1、X16-4-7 及 X16-5-1),主要为低温底面滑移形成的组构,滑移系为 $\{0001\} \langle a \rangle$,对应的温度小于 400℃,属于葡萄石-绿纤石相(嵇少丞,1988)。

变质相		葡萄石-绿纤石相	绿片岩相	角闪岩相	麻粒岩相	文献引用				
温度		350°C	400°C	450°C	500°C	550°C	600°C	650°C	700°C	嵇少丞, 1988
区域	样品	石英晶格优选定向						结构模式		
甘登-加拉萨段	X16-1-2							滑移系: $\{10\bar{1}0\}\langle c \rangle$ 变质相: 麻粒岩相 变形温度 (°C): >650		
	X16-1-6							滑移系: $\{10\bar{1}0\}\langle c \rangle$ 变质相: 麻粒岩相 变形温度 (°C): >650		
	X16-3-1							滑移系: $\{0001\}\langle a \rangle$ 变质相: 葡萄石-绿纤石相 变形温度 (°C): <400		
	X16-4-7							滑移系: $\{0001\}\langle a \rangle$ 变质相: 葡萄石-绿纤石相 变形温度 (°C): <400		
	X16-5-1							滑移系: $\{0001\}\langle a \rangle$ 变质相: 葡萄石-绿纤石相 变形温度 (°C): <400		
	X17-2-1							滑移系: $\{10\bar{1}0\}\langle a \rangle$ 滑移系: $\{10\bar{1}1\}\langle a \rangle$		
	X17-3-2							滑移系: $\{10\bar{1}0\}\langle a \rangle$ 变质相: 角闪岩相 变形温度 (°C): 500-650		
	X17-5-1							滑移系: $\{10\bar{1}0\}\langle a \rangle$ 变质相: 角闪岩相 变形温度 (°C): 500-650		
	X17-5-2							滑移系: $\{10\bar{1}0\}\langle a \rangle$ 变质相: 角闪岩相 变形温度 (°C): 500-650		
	X17-5-5							滑移系: $\{10\bar{1}0\}\langle a \rangle$ 变质相: 角闪岩相 变形温度 (°C): 500-650		

图 11 墨脱剪切带甘登-加拉萨段石英 EBSD 测量结果

Fig. 11 LPOs of quartz from the Gandeng-Damu shear zone (by EBSD measurement)

综上, 石英组构图显示墨脱剪切带阿尼桥-希让段经历了从中温、滑移系为 $\{10\bar{1}0\} \langle a \rangle \rightarrow$ 低温、滑移系为 $\{0001\} \langle a \rangle$ 的组构演化; 旁辛-达木段经历了从高温、滑移系为 $\{10\bar{1}0\} \langle c \rangle \rightarrow$ 中温、滑移系为 $\{10\bar{1}0\} \langle a \rangle \rightarrow$ 中低温、滑移系为 $\{10\bar{1}1\} \langle a \rangle$ 的组构演化, 其中以中温(角闪岩相)变形为主; 同样地, 甘登-加拉萨段经历了从高温、滑移系为 $\{10\bar{1}0\} \langle c \rangle \rightarrow$ 中温、滑移系为 $\{10\bar{1}0\} \langle a \rangle \rightarrow$ 低温、滑移系为 $\{0001\} \langle a \rangle$ 的组构演化。

6 讨论与结论

6.1 东构造结东、西边界剪切带运动学特征

根据东喜马拉雅构造结西侧东久-米林剪切带的左行和东侧墨脱剪切带的右行运动学特征特征(刘焰和钟大赉, 1998; Burg *et al.*, 1998; Ding *et al.*, 2001; 张进江等, 2003; 许志琴等, 2008), 推测在印度板块和欧亚板块碰撞之后, 南迦巴瓦变质体受制于这两条韧性剪切带而相对喜马拉雅地体向北推移, 并楔入拉萨地体之下。许志琴等(2008)进一步对东喜马拉雅构造结西北界的变形性质及组构运动学进行研究, 发现东久-米林剪切带并非简单的右行走滑运动性质, 各段存在明显的差异性, 并逐渐演化: 北端、中段及南端分别具有韧性逆冲剪切带、左行走滑剪切带及左行伸展转换剪切的性质。此次, 笔者通过翔实的野外地质考察得到了同样的结果, 即墨脱剪切带亦具有各段差异性, 从南至北分别是: NE 走向具右行兼上盘下滑性质的阿尼桥-希让段, 近 N-S 向具右行走滑性质的旁辛-达木段及 N(N)W 向具右行兼逆冲性质的甘登-加拉萨段。由此可见, 东喜马拉雅构造结东、西边界剪切带运动学特征具有很好的对应性, 进一步限定了南迦巴瓦变质体向北推移并插入拉萨地体之下的运动轨迹。

6.2 墨脱剪切带形成环境

在走滑剪切过程中, 遭受强烈变形、变质作用改造的岩石中保存了大量的中高温矿物组合、显微构造与组构等特征, 为解释剪切带的滑移规模、深度、时间及速率等提供重要依据。从上述中可以得出, 在墨脱剪切带内识别出两类剪切变形: 高温剪切变形和低温剪切变形。高温剪切变形以角闪石、长石和石英等矿物的高温晶质塑性变形特征为主。宏观的剪切标志如: A 型褶皱、长石残斑等均指示墨脱地区经历了强烈的右行剪切变形。角闪石颗粒强烈动态重结晶并且呈定向排列, 残斑内波状消光、亚颗粒, 表明至少达到角闪岩相的变形环境(Kruse *et al.*, 1999)。长石残斑构成 σ 和 δ 型组构的拖尾及大量的蠕英结构, 表明区内高温变形环境的存在。石英晶体的变形与石英组构的形成也得出一致的结果, 石英 EBSD 组构数据显示区内以 $\{10\bar{1}0\} \langle a \rangle$ 滑移系为主, 对应的温度为 550 ~ 650°C, 达到角闪岩相, 表明石英是在相对较高温度条件下的变形及定向生长为主导地位; 局部(北端和中段)出现了 $\{10\bar{1}0\} \langle c \rangle$ 滑移系, 温度更高, 大于

650°C, 相当于下地壳的深度。以上为墨脱剪切带发生高温剪切变形提供了强有力的依据。

低温剪切变形在带内普遍发育, 前已述及, 以片状矿物定向排列、长石脆性变形及石英韧性变形等现象为主。石英亚颗粒及重结晶颗粒消光不均匀显示矿物颗粒内部存在应变, 表明岩石变形发生在地壳浅部的绿片岩相。石英 EBSD 组构也得出一致的结果, 数据显示区内以 $\{10\bar{1}1\} \langle a \rangle$ 和 $\{0001\} \langle a \rangle$ 滑移系为主, 对应的温度小于 550°C, 即剪切变形发生在绿片岩相及绿片岩相以下环境。

致谢 样品加工在廊坊市科大岩石矿物分选技术服务公司完成; EBSD 测试在大陆构造与动力学国家重点实验室完成, 测试和分析过程中得到陈方远研究员的帮助; 在此一并表示衷心的感谢。

References

- Booth AL, Zeitler PK, Kidd WSF, Wooden J, Liu YP, Idleman B, Hren M and Chamberlain CP. 2004. U-Pb zircon constraints on the tectonic evolution of southeastern Tibet, Namche Barwa area. *American Journal of Science*, 304(10): 889 - 929
- Burg JP, Nievergelt P, Oberli F, Seward D, Davy P, Maurin JC, Diao ZZ and Meier M. 1998. The Namche Barwa syntaxis: Evidence for exhumation related to compressional crustal folding. *Journal of Asian Earth Sciences*, 16(2-3): 239 - 252
- Ding L, Zhong DL, Pan YS, Huang X and Wang QL. 1995. Fission-track evidence for Neocene uplift of eastern Himalayan syntaxis. *Chinese Science Bulletin*, 40(16): 1497 - 1500 (in Chinese)
- Ding L and Zhong DL. 1999. Metamorphic characteristics and geotectonic implications of the high-pressure granulites from Namjagarwa, eastern Tibet. *Science in China (Series D)*, 42(5): 491 - 505
- Ding L, Zhong DL, Liu Y, Kapp P and Harrison M. 2001. Cenozoic structural and metamorphic evolution of the eastern Himalayan syntaxis (Namche Barwa). *Earth and Planetary Science Letters*, 192(3): 423 - 438
- Holt WE, Ni JF, Wallace TC and Hanijs AJ. 1991. The active tectonics of the eastern Himalayan syntaxis and surrounding regions. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 96(B9): 14595 - 14632
- Hu L, Liu JL, Ji M, Cao SY and Zhao ZY. 2010. *Recognition Manuals of Microscopic Structure*. Beijing: Geological Publishing House, 41 - 73 (in Chinese)
- Ji SC. 1988. Tectonic significance of partial melting (1): Experiment study on transition of deformation mechanism. *Scientia Geologica Sinica*, 4: 347 - 356 (in Chinese with English abstract)
- Kruse R and Stunite H. 1999. Deformation mechanisms and phase distribution in mafic high-temperature mylonites from the Jotun Nappe, Southern Norway. *Tectonophysics*, 303(1-4): 223 - 249
- Le Fort P, Gullot S and Peeher A. 1997. HP metamorphic belt along the Indus suture zone of NW Himalaya; New discoveries and significance. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, 325(10): 773 - 778
- Li G, Liu ZH, Liu JL, Li YF, Xu ZY and Dong XJ. 2012. Formation and timing of the extensional ductile shear zones in Yiwulü Mountain area, western Liaoning Province, North China. *Science China (Earth Sciences)*, 55(5): 733 - 746
- Liu Y and Zhong DL. 1997. Petrology of high-pressure granulites from the eastern Himalayan syntaxis. *Journal of Metamorphic Geology*, 15(4): 451 - 466
- Liu Y and Zhong DL. 1998. Petrology of high-pressure granulites from eastern Himalaya; Implications to tectonic significance. *Scientia*

- Geologica Sinica, 33(3): 267–281 (in Chinese with English abstract)
- Liu Y, Siebel W and Wang M. 2006. Intracontinental deformed processes of the Eastern Himalayan Syntaxis. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1274–1285 (in Chinese with English abstract)
- Liu YH. 1985. Summary of geological structures in the Mt. Namjagbarwa Region. *Mountain Research*, 3(4): 325–326 (in Chinese)
- Qi XX, Li TF, Li HQ, Cai ZH and Yu CL. 2010. Zircon SHRIMP U-Pb dating for garnet-rich granite veins in high-pressure granulites from the Namche Barwa complex eastern syntaxis of the Himalaya and the relationship with exhumation. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 975–984 (in Chinese with English abstract)
- Sun ZM, Geng QR, Lou XY, Zheng LL, Li S and Liao GY. 2004a. The subdivision of the Namjagbarwa Group complex within the eastern Himalayan syntaxis, Xizang. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 24(2): 8–15 (in Chinese with English abstract)
- Sun ZM, Zheng LL, Geng QR, Li S, Liao GY, Shi WL and Zhang D. 2004b. Genetic mechanisms and exhumation processes of the high-pressure granulites within the eastern Himalayan syntaxis, Xizang. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 24(3): 22–29 (in Chinese with English abstract)
- Tonarini S, Vills IM, Oberli F, Meier M, Spencer DA, Pognante U and Ramsay JG. 1993. Eocene age of eclogite metamorphism in Pakistan Himalays: Implications for India-Eurasia collision. *Terra Nova*, 5(1): 13–20
- Wang TW. 1985. Metamorphism generalization of the Mt. Namjagbarwa Region. *Mountain Research*, 3(4): 196–205 (in Chinese)
- Xu ZQ, Cai ZH, Zhang ZM, Li HQ, Chen FY and Tang ZM. 2008. Tectonics and fabric kinematics of the Namche Barwa terrane, Eastern Himalayan Syntaxis. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 463–476 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Wang Q, Liang FH, Chen FY and Xu CP. 2009. Electron backscatter diffraction (EBSD) technique and its application to study of continental dynamics. *Acta Petrologica Sinica*, 25(7): 1721–1736 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Ji SC, Cai ZH, Zeng LS, Geng QR and Cao H. 2012. Kinematics and dynamics of the Namche Barwa Syntaxis, eastern Himalaya: Constraints from deformation, fabrics and geochronology. *Gondwana Research*, 21(1): 19–36
- Zeng LS, Gao LE, Xie KJ and Jing LZ. 2011. Mid-Eocene high Sr/Y granites in the northern Himalayan gneiss domes: Melting thickened lower continental crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 303(3–4): 251–266
- Zhang JJ, Ji JQ, Zhong DL, Sang HQ and He SD. 2002. Structural and chronological evidence for the India-Eurasia collision of the Early Paleocene in the Eastern Himalayan Syntaxis, Namjagbarwa. *Acta Geologica Sinica*, 76(4): 446–454
- Zhang JJ, Ji JQ, Zhong DL, Ding L and He SD. 2004. Structural pattern of eastern Himalayan syntaxis in Namjagbarwa and its formation process. *Science in China (Series D)*, 47(2): 138–150
- Zhang ZG, Liu YH and Wang TW. 1992. Geology of the Mt. Namjagbarwa Region. Beijing: Sciences Press (in Chinese)
- Zhang ZM, Zheng LL, Wang JL, Zhao XD and Shi C. 2007. Garnet pyroxenite in the Namjagbarwa Group-complex in the eastern Himalayan tectonic syntaxis, Tibet, China: Evidence for subduction of the Indian continent beneath the Eurasian plate at 80–100km depth. *Geological Bulletin of China*, 26(1): 1–12 (in Chinese with English abstract)
- Zheng LL, Jin ZM, Pan GT, Geng QR and Sun ZM. 2004. Geological feature and tectonic evolution in the Namjagbarwa area, eastern Himalayas. *Acta Geologica Sinica*, 78(6): 744–751 (in Chinese with English abstract)
- Zhong DL and Ding L. 1996. Finding of the high-pressure granulite from the Namche Barwa, Southern Tibet. *Chinese Science Bulletin*, 40(1): 87–88
- Zhou YS and Zhang Q. 1981. Magmatic and Metamorphism in Tibet. Beijing: Sciences Press (in Chinese)

附中文参考文献

- 丁林, 钟大赉, 潘裕生, 黄萱, 王庆隆. 1995. 东喜马拉雅构造结上新世以来快速抬升的裂变径迹证据. *科学通报*, 40(16): 1497–1500
- 丁林, 钟大赉. 1999. 西藏南迦巴瓦峰地区高压麻粒岩相变质作用特征及其构造地质意义. *中国科学(D辑)*, 29(5): 385–397
- 胡玲, 刘俊来, 纪沫, 曹淑云, 张宏远, 赵中岩. 2010. 变形显微构造识别手册. 北京: 地质出版社, 41–73
- 嵇少丞. 1988. 部分熔融的构造地质意义(1): 变形机制转变的实验研究. *地质科学*, 4: 247–356
- 李刚, 刘正宏, 刘俊来, 李永飞, 徐仲元, 董晓杰. 2012. 医巫闾山伸展型韧性剪切带的形成过程及年代学证据. *中国科学(地球科学)*, 42(6): 879–892
- 刘焰, 钟大赉. 1998. 东喜马拉雅地区高压麻粒岩岩石学研究及构造意义. *地球科学*, 33(3): 267–281
- 刘焰, Siebel W, 王猛. 2006. 东喜马拉雅构造结陆内变形过程的研究. *地质学报*, 80(9): 1274–1285
- 刘玉海. 1985. 南迦巴瓦峰地区地质构造概况. *山地研究*, 3(4): 325–326
- 戚学祥, 李天福, 李化启, 蔡志慧, 于春林. 2010. 东喜马拉雅构造结南迦巴瓦群高压麻粒岩中含石榴石花岗岩脉锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其与折返作用. *岩石学报*, 26(3): 975–984
- 孙志明, 耿全如, 楼雄英, 郑来林, 李生, 廖光宇. 2004a. 东喜马拉雅构造结南迦巴瓦岩群的解体. *沉积与特提斯地质*, 24(2): 8–15
- 孙志明, 郑来林, 耿全如, 李生, 廖光宇, 石文礼, 张东. 2004b. 东喜马拉雅构造结高压麻粒岩特征、形成机制及折返过程. *沉积与特提斯地质*, 24(3): 22–29
- 王天武. 1985. 南迦巴瓦峰地区变质作用概述. *山地研究*, 3(4): 196–205
- 许志琴, 蔡志慧, 张泽明, 李化启, 陈方远, 唐哲民. 2008. 喜马拉雅东构造结-南迦巴瓦构造及组构运动学. *岩石学报*, 24(7): 1463–1476
- 许志琴, 王勤, 梁风华, 陈方远, 许翠萍. 2009. 电子背散射衍射(EBSD)技术在大陆动力学研究中的应用. *岩石学报*, 25(7): 1721–1736
- 张进江, 季建清, 钟大赉, 丁林, 何顺东. 2003. 东喜马拉雅南迦巴瓦构造结的构造格局及形成过程探讨. *中国科学(D辑)*, 33(4): 373–383
- 章振根, 刘玉海, 王天武. 1992. 南迦巴瓦峰地区地质. 北京: 科学出版社
- 张泽明, 郑来林, 王金丽, 赵旭东, 石超. 2007. 东喜马拉雅构造结南迦巴瓦岩群中的石榴辉石岩——印度大陆向欧亚板块之下俯冲至 80–100km 深度的证据. *地质通报*, 26(1): 3–12
- 郑来林, 金振民, 潘桂棠, 耿全如, 孙志民. 2004. 东喜马拉雅南迦巴瓦地区区域地质特征及构造演化. *地质学报*, 78(6): 744–751
- 钟大赉, 丁林. 1995. 西藏南迦巴瓦峰地区发现高压麻粒岩. *科学通报*, 40(14): 1343
- 周云生, 张旗. 1981. 西藏岩浆活动和变质作用. 北京: 科学出版社